

Микротвердость полученных порошков в зависимости от состава реакционной шихты и режима получения варьируется в диапазоне от 1,7 до 4,6 ГПа.

Таким образом, проведенные исследования показали, что легированный хромом моноалюминид железа может быть сформирован как в системах, полученных с использованием алюминотермической реакции восстановления оксида хрома, так и при использовании в качестве исходного порошка сплава ПХ30. Основной проблемой получения композиционных порошков является однородность распределения оксидных включений в объеме материала, которая обеспечивается подбором оптимальных режимов механической активации и последующего синтеза.

Список литературы

1. Liu, C.T. Ordered intermetallic alloys: an assessment / C.T. Liu [et. al.] // Intermetallics. – 1997. – Vol. 5. – P. 579-596.
2. Revol, S. Industrial Applications of FeAl40 Grade 3. / S. Revol, S. Launois, R. Baccino. // PM2001, Superalloys/Intermetallics. – 2001. – P. 421-426.
3. Subramanian, R. Iron-aluminide- Al_2O_3 composites by in situ displacement reactions: processing and mechanical properties / R. Subramanian [et. al.] // Mater. Sci. Eng. A. – 1998. – V. 254. – P. 119-128.
4. Левашов, А.Е., Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. / А.Е. Левашов [и др.]. – М.: Издательство БИНОМ, 1999. – 176 с.
5. Talako, T. Combustion Synthesis of Nanocomposite Powders Using a Mechanically Activated Process. / T.L. Talako, A.I. Letsko, T.Ph. Grigorieva. // Combustion Science and Technology. – 2010. – Vol. 182, Issue 11. – P. 1598-1609.

Results of investigations of structure and properties of composite powders based on iron monoaluminide and strengthened with fine dispersed alumina inclusions, produced by mechanically activated self-propagating high-temperature synthesis, are presented. Possibilities of alloying of iron monoaluminide with chromium are discussed.

УДК 621.785.545:669.14

А.Е. Вуец

(Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»)

СОЗДАНИЕ АДЕКВАТНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ СКОРОСТНОМ НАГРЕВЕ В ПРОЦЕССЕ ОТПУСКА

Статья посвящена прогнозированию термических процессов путем моделирования температурных полей во время нагрева токами высокой частоты (ТВЧ) в процессе отпуска.

Целью работы было моделирование температурных полей при скоростном отпуске с нагревом ТВЧ, которое даст возможность спрогнозировать температуру по сечению изделия. Это позволит подобрать оптимальное время нагрева, которое обеспечит проведение равномерного нагрева от поверхности к сердцевине изделия, что поможет решить главную задачу при проведении скоростного отпуска.

Тепловое поле характеризуется пространственным распределением температуры и плотности потока тепловой мощности. Уравнения теплового поля в дифференциальной форме имеют вид:

$$\text{div } \rho T = Q - U / t \quad (1)$$

$$\rho T = -k \cdot \text{grad } T \quad (2)$$

$$U / t = (\rho \cdot C \cdot T) / t = \rho \cdot C \cdot dT / dt, \quad (3)$$

где ρT – плотность потока тепловой мощности, Вт/м; Q – объёмная плотность мощности сторонних источников тепла, Вт/м³; U – объёмная плотность внутренней тепловой энергии вещества, Дж/м³; k – теплопроводность вещества, Вт/К*м; T – температура, ρ – плотность вещества, кг/м³; C – удельная теплоёмкость вещества, Дж/кг* К.

Выражение (1) – фундаментальное уравнение теплового поля; Выражение (2) – уравнение, описывающее теплопроводящие свойства вещества; (3) – уравнение, описывающее динамические тепловые свойства вещества [1].

Подставив выражения (2) и (3) в выражение (1), получим:

$$\rho \cdot C \cdot T / t - \text{div}(k \cdot \text{grad } T) = Q. \quad (4)$$

Выражение (4) – уравнение теплопроводности относительно поля температур. Это уравнение описывает динамический режим теплового поля. В статическом режиме $T/t = 0$, поэтому:

$$-\text{div}(k \cdot \text{grad } T) = Q. \quad (5)$$

Выражение (4) называют параболическим, а выражение (5) – эллиптическим.

Т.к. целью является моделирование теплового поля, меняющегося со временем, необходимо воспользоваться параболическим уравнением (4), которое и описывает динамический режим теплового поля.

Пакет MatLab содержит приложение PDEToolbox, которое обеспечивает решение дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов в двухмерной постановке. При этом область построения разбивается на конечное число элементарных подмножеств стандартной формы (конечные элементы). В системе MatLab эти конечные элементы представляют собой криволинейные треугольники. Приложение включает в себя интерфейс, инструменты задания формы уравнений и граничных условий, процедуру автоматической генерации сетки конечных элементов, средства для визуализации полученного решения и его анимации.

В пакете PDEToolbox краевая задача теплопроводности базируется на уравнениях (4), (5). Приведенная система уравнений дополняется условиями однозначности, которые включают в себя:

- геометрические условия, которые определяют форму и размеры области, в которой протекает исследуемый процесс;
- граничные условия, которые определяют особенности протекания процесса на границах исследуемой области (граничные условия Дирихле или Неймана);
- физические условия задаются теплофизическими свойствами вещества, которое заполняет исследуемую область, т.е. марки стали. Кроме того, они учитывают распределение внутренних источников и стоков теплоты по объему;
- временные (начальные) условия содержат распределение искомой величины в начальный момент времени.

Моделирование тепловых полей при проведении скоростного отпуска с нагревом ТВЧ в теле образцов, имеющих цилиндрическую форму, проводилось для высоколегированной стали 20X13. Температура нагрева для данного вида термической обработки выбрана 700 °С.

Моделирование температурных полей по сечению образца путем решения дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных при скоростном нагреве ТВЧ и обычном печном нагреве будет отличаться. При нагреве ТВЧ в отличие от печного, выделение теплоты происходит непосредственно в зонах образца, подвергаемых воздействию переменного магнитного поля и электрического тока. Глубина проникновения тока в металл зависит от частоты тока и физических свойств металла. В начале нагрева теплота выделяется в слое, равном глубине проникновения тока в холодный металл, обладающий ферромагнитными свойствами. Температура в данный период нагрева будет резко возрасть лишь в тонком поверхностном слое (скин-слой).

Когда температура поверхностного слоя металла достигнет точки Кюри, магнитная проницаемость его станет близкой к единице и количество теплоты, выделяющейся в этом слое, уменьшится. Это приведет к замедлению повышения температуры. Так как конечное распределение температуры устанавливается за определенный промежуток времени, часть тепловой энергии за счет теплопроводности будет отводиться в глубь изделия. Чем выше скорость нагрева, тем меньше влияние фактора теплопроводности и тем более резким будет спадание температуры за горячим слоем. Для уменьшения перепада температуры по сечению нагретого слоя при нагреве ТВЧ скорость нагрева приходится снижать, что приводит к переносу значительного количества теплоты в сердцевину изделия. При скоростном отпуске с помощью ТВЧ необходимо именно такие рекомендации, вследствие чего к концу нагрева достигается минимальный перепад температуры по сечению [2].

Для расчёта приближенной глубины проникновения тока или скин-слоя (d_{skin} , м) в металле воспользуемся формулой(6):

$$d_{\text{skin}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_m f}}, \quad (6)$$

где ρ — удельное сопротивление, Ом*м; μ — относительная магнитная проницаемость, f — частота тока ($f = 400\,000$ Гц).

По формуле (6) просчитаем скин-слой для стали 20X13 при нагреве ТВЧ до 700 °С. Подставив в уравнение значение μ и ρ при температуре 20 °С и 700 °С посчитаем крайние точки слоя. Усреднив полученные значения, найдем приближенное значение величины скин-слоя $d_{\text{skin}} \approx 0,405$ мм.

При моделировании не учитывалось:

- влияние предшествующей отпуску термической обработки, т.е. закалки (глубина закаленного слоя, его твердость и микроструктура);
- скорость нагрева до заданной температуры (принимая, что скин-слой по всей толщине имеет постоянную температуру 700 °С и достигает её мгновенно);
- отсутствуют дополнительные источники тепла, кроме основного, т.е. объемная плотность мощности сторонних потоков $Q = 0$;

- нет конвективного теплообмена поверхности с окружающей средой, т.е. коэффициент конвективного теплообмена $h=0$.

В приложении PDETool для решения дифференциального уравнения теплопроводности необходимо вводить значения в системе СИ. Искомой величиной является температура (U), выраженная в градусах Кельвина. Для упрощения восприятия модели при графическом выводе имеем возможность вывести показания температуры в градусах Цельсия. Для этого в окне установления параметров графика, прописываем заданную функцию «U-273».

Рассмотрим конкретную модель распределения температурных полей.

Из рисунка 1 видно, что цилиндрический образец диаметром 4 мм при скоростном нагреве до 700 °C прогревается равномерно от поверхности к сердцевине за 1 секунду ($\Delta T=6$ °C).

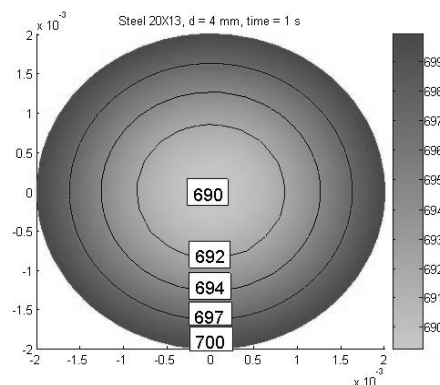


Рис. 1. Распределение температурного поля при скоростном отпуске 700 °C в образце из стали 20X13 диаметром 4 мм (время 1 с)

В цилиндрическом образце диаметром 10 мм, вследствие значительного увеличения диаметра, температурное поле за 1 секунду (рис. 2а) распределится крайне неравномерно от поверхности к центру ($\Delta T = 450$ °C).

Путем моделирования показано, что для образцов с таким диаметром оптимальным временем нагрева для достижения минимального перепада температур по сечению ($\Delta T = 20$ °C) является 5 секунд (рис. 2б).

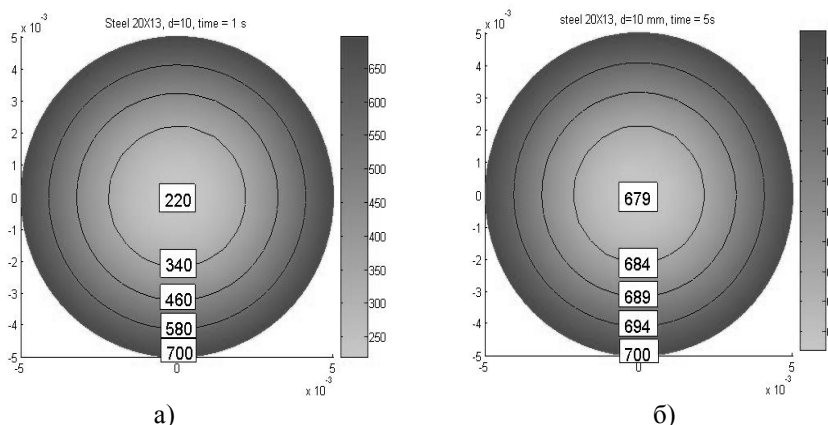


Рис. 2. Распределение температурного поля при скоростном отпуске 700 °C в образцах из стали 20X13 диаметром 10 мм (а – 1 секунда; б – 5 секунд)

Массив данных, представляющий результаты моделирования, может в дальнейшем изучаться для уточнения закона распределения температуры в различных точках образца и при различной длительности процесса.

Список литературы

1. Шмелев, В.Е. Partial Differential Equations Toolbox, Инструментарий решения дифференциальных уравнений в частных производных. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/pde/book1>.
2. Головин, Г.Ф. Высоочастотная термическая обработка: Вопросы металловедения и технологии. / Г.Ф. Головин, М.М. Замятин. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 239 с.

The given work is devoted to the forecasting of thermal processes (tempering) at heating by high frequency currents (HFC) by temperature fields modeling.